

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Tomislav Hrdelja**

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

Mentori:

Dr. sc. Damir Ciglar, dipl. ing.

Student:

Tomislav Hrdelja

Zagreb, 2017.

Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **TOMISLAV HRDELJA**

Mat. br.: 0035194911

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **POSTUPCI DUBOKOG BUŠENJA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **DEEP DRILLING PROCESSES**

Opis zadatka:

Staklene boce se danas često koriste kao ambalažno sredstvo, a izrađuju se pomoću kalupa za izradu boca. Ti kalupi rade na visokim temperaturama, moraju se hladiti i zbog toga se u njima izrađuju duboki provrti za hlađenje.

U radu je potrebno dati literaturni pregled različitih postupaka dubokog bušenja kojima se mogu izraditi duboki provrti različitih promjera. Poseban naglasak treba dati na načine izrade dubokih provrta u kalupima za izradu staklenih boca, njihove karakteristike i mogućnosti.

Zadatak zadan:

30. studenog 2016.

Zadatak zadao:

Prof.dr.sc. Damir Ciglar

Rok predaje rada:

**1. rok:** 24. veljače 2017.

**2. rok (izvanredni):** 28. lipnja 2017.

**3. rok:** 22. rujna 2017.

Predviđeni datumi obrane:

**1. rok:** 27.2. - 03.03. 2017.

**2. rok (izvanredni):** 30. 06. 2017.

**3. rok:** 25.9. - 29. 09. 2017.

v.d. predsjednika Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

## **IZJAVA**

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Damiru Ciglaru na ukazanoj pomoći, korisnim primjedbama i savjetima u svrhu poboljšanja kvalitete ovoga rada. Također se zahvaljujem tvrtki Omco Croatia d.o.o. koja mi je velikodušno ustupila informacije i ukazala povjerenje.

Ponajviše zahvaljujem svojim roditeljima majci Bosiljki, ocu Tihomiru, sestrama Neveni i Nikolini te djevojci Steli za sve što su mi učinili kako bi mi olakšali studij.

Također, zahvaljujem svima koji su mi na bilo koji način tijekom studija pomogli u ostvarivanju mojih ciljeva.

Tomislav Hrdelja

## SAŽETAK

Postoje brojni postupci izrade dubokih provrta u današnjem metaloprerađivačkom svijetu. Svrkla koja se koriste svakodnevno, bilo kao obična spiralna svrdla ili kao svrdla za duboko bušenje, potrebno je unapređivati. Bušenje, kao jedno od najzastupljenijih postupaka obrade odvajanjem čestica u proizvodnoj industriji, postaje sve kompliciranije s povećanjem dubine bušenja. Uz postupke dubokog bušenja, prvenstveno onih koji se koriste pri izradi dubokih provrta u kalupu za izradu staklenih boca, u ovom je radu prikazan i kratak pregled osnovnih značajki bušenja kao postupka obrade odvajanjem čestica, također geometrijskih parametara alata za bušenje te hlađenja i podmazivanja tijekom postupka bušenja.

Ključne riječi: svrdla, duboko bušenje, kalup za izradu staklenih boca

## **SUMMARY**

There are numerous deep holes produced in today's metalworking industries. Drilling tools predominantly used nowadays, such as usually twist drill or gun drill, need to improve. Drilling, which are used for one of the most common machining operation in manufacturing industry, becomes more and more difficult with increasing drilling depth. With operation of deep drilling, primarily those used in the deep holes in the mould for making glass bottles, in this final work is shown short review of base features for drilling as machining operation of separating chips, also geometric parameters of drilling tools and cooling and lubrication during the drilling.

Key words: drills, deep drilling, mould for making glass bottles

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
1. UVOD.....	1
2. SVRDLA I NJIHOVE OSNOVNE KARAKTERISTIKE.....	3
2.1. Spiralno svrdlo .....	3
2.1.1. Kutovi spiralnog svrdla .....	4
2.2. Geometrijski parametri odvajanja sloja kod bušenja .....	6
2.3. Sile rezanja kod bušenja .....	7
2.4. Elementi režima obrade kod bušenja .....	9
2.4.1. Utjecaj različitih faktora na brzinu rezanja kod bušenja .....	11
2.4.2. Snaga stroja pri bušenju .....	12
2.5. Trošenje i zatupljenje svrdla .....	13
2.6. Odvojena čestica .....	14
3. HLAĐENJE, ISPIRANJE I PODMAZIVANJE PRI REZANJU .....	15
3.1. Efekti primjene.....	15
3.2. Svojstva sredstava za hlađenje, ispiranje i podmazivanje.....	15
3.3. Vrste sredstava i primjena.....	16
3.4. Način dovođenja sredstava kod bušenja .....	17
4. DUBOKO BUŠENJE .....	19
4.1. STS postupak dubokog bušenja provrta.....	19
4.2. Duboko bušenje ejektorskim postupkom .....	20
4.3. Duboko bušenje provrta topovskim svrdlom .....	21
4.3.1. Jednoredna topovska svrdla .....	23
4.3.2. Dvoredna topovska svrdla .....	24
4.4. Duboko bušenje provrta specijalnim spiralnim svrdlom .....	25
4.4.1. Walter Titex XD tehnologija .....	29
5. STROJEVI ZA DUBOKO BUŠENJE .....	31
5.1. Ručno upravljanje bušilice za duboko bušenje .....	31
5.2. Numerički upravljani stroj-Mollart Omnisprint.....	32
5.3. Numerički upravljani stroj- Toyota.....	32
6. ZAKLJUČAK.....	35
LITERATURA.....	36
PRILOZI.....	37

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Bušenje zatvorenih i prolaznih provrta [1].....	1
Slika 2.	Prikaz dijelova spiralnog svrdla [4].....	3
Slika 3.	Prikaz dijelova svrdla s koničnom drškom[4] .....	4
Slika 4.	Naziv konstruktivnih elemenata spiralnog svrdla .....	4
Slika 5.	Prikaz razvijene zavojnice i kutova alata i obrade [1].....	5
Slika 6.	Prikaz elemenata rezanja kod bušenja [5] .....	7
Slika 7.	Sile rezanja koje djeluju na spiralno svrdlo [4] .....	8
Slika 8.	Brzina rezanja kod bušenja [4].....	10
Slika 9.	Prikaz trošenja ruba spiralnog svrdla [8].....	13
Slika 10.	Provrt s dobrim odvođenjem odvojenih čestica (lijevo) i provrt s lošim odvođenjem odvojenih čestica (desno) [9].....	14
Slika 11.	Ovisnost odvojenih čestica o posmaku i brzini rezanja [9].....	14
Slika 12.	Svrdlo s kanalima za SHIP (lijevo) i svrdlo sa vanjskim dovođenjem SHIP-a (desno) [9] .....	18
Slika 13.	STS postupak bušenja [5].....	20
Slika 14.	Ejektorsko bušenje [5].....	21
Slika 15.	Princip bušenja topovskim svrdlom [5].....	21
Slika 16.	Primjer dubokog bušenja topovskim svrdlom.....	22
Slika 17.	Klizni katalog za izbor režima obrade.....	23
Slika 18.	Jednorezna topovska svrdla poduzeća TIEFBOHRTECHNIK [6].....	23
Slika 19.	Dvorezno topovsko svrdlo poduzeća TIEFBOHRTECHNIK [6].....	24
Slika 20.	Spiralno svrdlo poduzeća Walter Titex [10] .....	26
Slika 21.	Pilot svrdlo poduzeća Walter Titex [10] .....	26
Slika 22.	Prikaz presjeka kalupa.....	27
Slika 23.	Prikaz vakuum provrta i VF provrta na kalupu .....	28
Slika 24.	Prikaz stezanja kalupa na postolje.....	29
Slika 25.	Usporedba XD tehnologije i topovskog svrdla [7].....	29
Slika 26.	Bušenje pilot svrdlom [7] .....	30
Slika 27.	Ulazak svrdla u pilot provrt [7] .....	30
Slika 28.	Duboko bušenje do željene dubine [7] .....	30
Slika 29.	Izlazak svrdla iz provrta [7].....	30
Slika 30.	Shematski prikaz ručno upravljanoj stroja za duboko bušenje [4].....	31
Slika 31.	Prikaz numeričko upravljanoj stroja – Mollart Omnisprint [12].....	32
Slika 32.	Prikaz numeričkih upravljanih osi na Toyodi [13].....	33
Slika 33.	Prikaz obradnog centra Toyoda.....	33



## POPIS OZNAKA

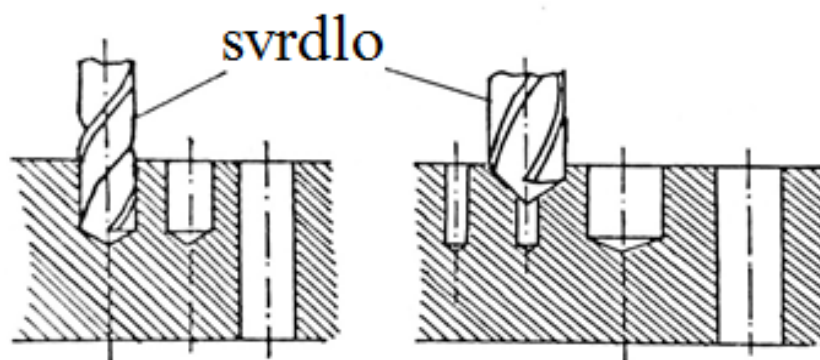
Oznaka	Jedinica	Opis
$a$	m	dubina rezanja
$A$	m <sup>2</sup>	površina poprečnog presjeka odvojene čestice
$b$	m	širina odvojene čestice
$d$	m	promjer obratka, promjer alata
$f$	mm	posmak
$f_z$	mm	posmak po zubu
$F_a$	N	aksijalna sila bušenja
$F_t$	N	tangencijalna komponenta sile rezanja
$F_c$	N	glavna sila rezanja
$F_{cp}$	N	glavna sila rezanja poprečne oštrice
$F_f$	N	posmična sila rezanja
$F_{fp}$	N	posmična sila rezanja poprečne oštrice
$F_p$	N	natražna sila rezanja
$F_t$	N	sila trenja
$f_f$	Nmm <sup>-2</sup>	specifična sila rezanja
$M_{Fc}$	Nm	moment glavnih sila rezanja
$M_{Fcp}$	Nm	moment glavnih sila rezanja na poprečnoj oštrici
$M_{Ft}$	Nm	moment sila trenja
$M_u$	Nm	ukupni moment
$P_B$	W	ukupna snaga (bruto snaga)
$P_N$	W	korisna snaga (neto snaga)
$n$	okr/s	broj okretaja
$v_c$	m/min	brzina rezanja
$v_{cm}$	m/min	srednja brzina rezanja
$v_f$	mm/min	posmična brzina
$\alpha$	rad	stražnji kut
$\beta$	rad	kut klina (oštrenja)
$\gamma$	rad	prednji kut
$2\varphi$	rad	kut vrha svrdla
$\psi$	rad	kut poprečne oštrice
$\omega$	rad	kut zavojnice utora

## 1. UVOD

Bušenje se pojavljuje kao vrlo česta, a i dugotrajna radna operacija. Izvodi se kružnim i pravocrtnim gibanjem svrdla. Kružnim gibanjem alat pod pritiskom prodire u materijal obratka te odvaja sloj materijala određene debljine da bi se postigao traženi promjer i kvaliteta površine provrta.

Ukoliko je potrebno bušiti manji broj provrta ili na manjem broju komada, bušenje se obično izvodi stolnom, stupnom ili radijalnom bušilicom. Kada imamo veći broj provrta velike serije sa više provrta i ako pri tome trebaju biti zadovoljeni zahtjevi u pogledu točnosti njihovih osnih razmaka, primjenjuje se više vreteno bušenje (istovremeno bušenje više provrta). Bušenje se može obavljati na tokarskim strojevima, ali tada obavlja glavno radno gibanje obradak, a posmično gibanje alat.

Bušenje nam omogućava dobivanje provrta i cilindričnih otvora u punom metalu, kao što je prikazano na slici 1, s točnostima IT7 do IT4 klase i kvalitetom obrađene površine koji odgovara 10-14 klasi.



Slika 1. Bušenje zatvorenih i prolaznih provrta [1]

Bušni alati ili svrdla mogu se podijeliti na:

- spiralna svrdla,
- svrdla s pločicama od tvrdog metala,
- ravna svrdla,
- zabušivala,
- specijalne izvedbe spiralnih svrdala.

Proces rezanja kod bušenja odlikuje se:

- promjenjivom brzinom rezanja uzduž glavne oštrice svrdla od  $v=0$  do  $v_{\max}$ ,
- promjenljivim prednjim i stražnjim kutovima uzduž glavne oštrice svrdla,
- poprečnom oštricom koja otežava proces rezanja,
- otežanim odvođenjem čestica materijala,
- malom krutošću alata i sustava u cjelini.

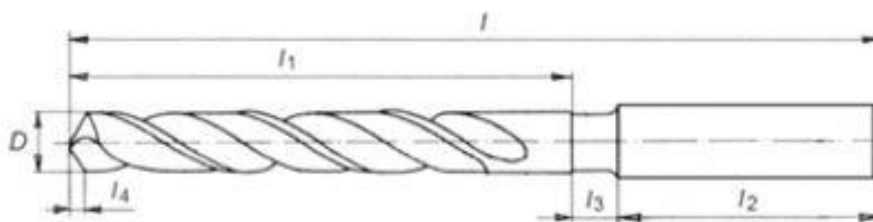
## 2. SVRDLA I NJIHOVE OSNOVNE KARAKTERISTIKE

### 2.1. Spiralno svrdlo

Svrdla su alati koji se upotrebljavaju za bušenje i proširivanje provrta različitih dubina u raznim materijalima.

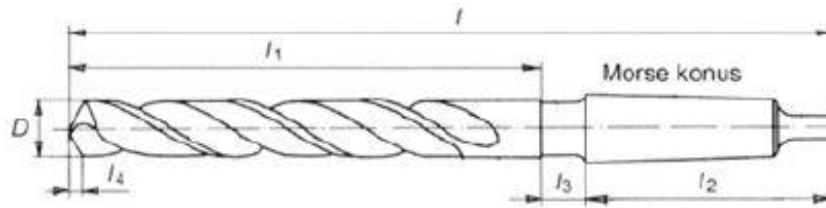
Spiralno svrdlo, prikazano na slici 2, sastoji se od:

- radne dužine svrdla ( $l_1$ ), koja sadrži spiralne utore, a uključuje u sebi rezni i kalibrirajući dio svrdla,
- reznog dijela koji je izbrušen u konus ( $2\phi$ ),
- usmjeravajućeg (kalibrirajućeg) dijela - dio svrdla koji osigurava usmjeravanje svrdla u procesu rezanja,
- drška ( $l_2$ ) - dio svrdla koji služi za pričvršćenje svrdla i prijenos okretnog momenta na svrdlo.



Slika 2. Prikaz dijelova spiralnog svrdla [4]

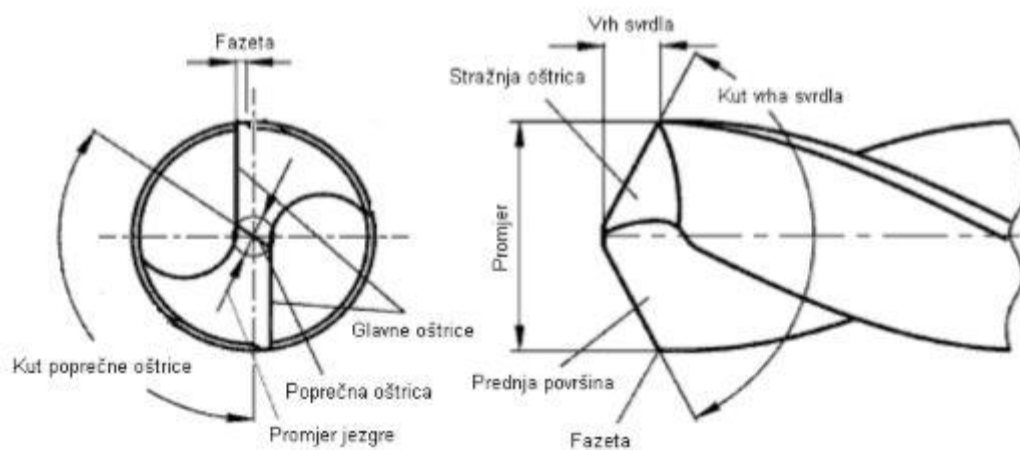
Razlikuje se spiralno svrdlo s valjkastom drškom koje je prikazano na slici 2. i spiralno svrdlo s koničnom drškom koje je prikazano na slici 3. Spiralna svrdla s valjkastom drškom najčešće se koriste radi ekonomičnosti jer je prihvat istog promjera kao i vrh svrdla, dok su izuzetak svrdla malog promjera kod kojih prihvat može biti većeg promjera radi bolje krutosti samog alata i jednostavnijeg stezanja. Konični prihvat je u većini slučajeva izveden sa Morse konusom, koji može prema dimenzijama biti od 0 do 6 (MK0-MK6). Svrdla s koničkom drškom koriste se kod većih promjera svrdla i kod većih sila bušenja. Svi Morse konusi su samokočni tako da nema potrebe za naknadnim stezanjem.



**Slika 3. Prikaz dijelova svrdla s koničnom drškom[4]**

Osnovni su elementi spiralnog svrdla prikazani na slici 3, a to su:

- prednja površina - zavojna površina utora, po kojoj klize odvojene čestice,
- stražnja površina - površina okrenuta prema površini rezanja,
- glavna rezna oštrica - linija koja nastaje presijecanjem prednje i stražnje površine alata. Spiralno svrdlo ima dvije glavne rezne oštrice, jedna drugoj prethodi za  $\pi$  rad ( $180^\circ$ ),
- rub - uski pojas na cilindričnoj površini svrdla, raspoređen uzduž zavojnog utora, a služi za usmjeravanje svrdla pri bušenju,
- poprečna oštrica - linija koja se dobije kod presijecanja dviju stražnjih površina.



**Slika 4. Naziv konstruktivnih elemenata spiralnog svrdla**

### 2.1.1. Kutovi spiralnog svrdla

Oblik i dimenzije svrdla propisani su standardima. Ovdje su navedeni samo osnovni podatci koji se odnose na konstrukciju reznog dijela svrdla.

Kut vrha svrdla  $2\varphi$  – to je kut kod kojeg nastaju dvije glavne rezne oštrice. Ovaj kut odabire se prema materijalu obratka jer vrši važan utjecaj na prednji geometrijski kut  $\gamma$ , stražnji geometrijski kut  $\alpha$ , kao i na otpornost jezgre svrdla. S povećanjem kuta  $2\varphi$  povećava se i otpor rezanja, a s tim u vezi i naprezanje svrdla na uvijanje i izvijanje.

Kut zavojnice utora  $\omega$  – je kut između osi svrdla i razvijenog brida utora. Ovaj kut određuje veličinu prednjeg geometrijskog kuta  $\gamma$ . Povećanjem kuta uspona zavojnice  $\omega$ , povećava se i kut  $\gamma$ , ujedno se popravljaju uslovi rezanja, smanjuje momenat uvijanja kao i otpori rezanja. Istovremeno se smanjuje krutost svrdla i trajnost oštrice, pogotovo ako su u pitanju mala svrdla. Korak zavojnice  $\omega$  izračunava se po sljedećoj formuli:

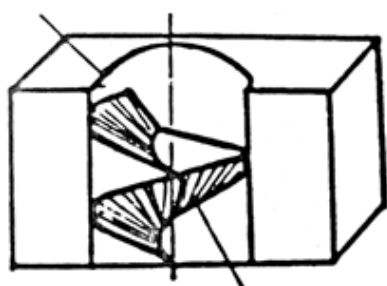
$$H = D * \cotg \omega \quad (1)$$

Ovaj kut bira se prema materijalu obratka. Veliki korak uzima se za broncu i tvrde čelike, srednji korak za obradu čelika, a mali korak za obradu aluminija i njegovih legura.

Kut poprečne oštrice  $\psi$  – je kut što ga zatvara poprečna oštrica s ravninom koja prolazi glavnom oštricom paralelno sa smjerom osi svrdla. Ovaj je kut mjerodavan da se utvrdi da li podbrušene površine imaju traženi oblik, a podbrušeni kutovi ispravne vrijednosti. Kut poprečne oštrice  $\psi$  mora biti u točno određenim granicama, a ne smije iznositi više od  $0,36\pi$  rad. Preveliki kut poprečne oštrice daje veću silu posmaka što sve skupa dovodi do većeg utroška snage i vremena rada.

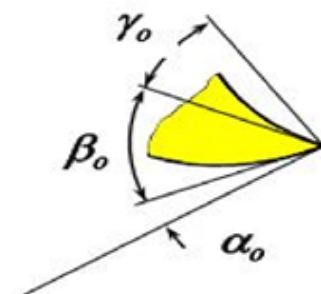
Rezni dio spiralnog svrdla s prikazom reznih oštrica, geometrijskih kutova svrdla u jednom presjeku i površine rezanja prikazan je na slici 5.

Obradena površina



Površina rezanja

a.



b.

Slika 5. Prikaz razvijene zavojnice i kutova alata i obrade [1]

Na slici 5. a prikazane su površine kod bušenja, a na slici 5. b prikazani su za jednu od glavnih oštrica u razvijenom obliku kutovi na obodu svrdla i to:

- geometrijski kutovi ili kutovi alata,
- kinematski kutovi ili kutovi obrade.

Proces odvajanja čestica shematski je prikazan na slici 6. s provrtom u razvijenom obliku, tj.  $D\pi=2\pi$  rad. Iz slike 6. vidi se da su obje glavne rezne oštrice istovremeno u zahvatu i da jedna drugoj prethodi za  $\pi$  rad ( $180^\circ$ ).

Iz slike 6. vidi se i da kut koji zatvara stražnja površina svrdla s površinom okomitom na os svrdla je stražnji geometrijski kut  $\alpha$ . Ista površina zatvara se pravcem rezanja oštrice svrdla kinematski stražnji kut  $\alpha_0$  (kut obrade) koji je jednak

$$\alpha_0 = \alpha - \varphi = \alpha - \arctan \frac{f}{D\pi} . \quad (2)$$

Slično kao kod stražnjeg kuta  $\alpha_0$  određuje se prednji kinematski kut  $\gamma_0$ , kao kut između prednje površine svrdla i okomice na pravac rezanja:

$$\gamma_0 = \gamma + \varphi = \gamma - \arctan \frac{f}{D\pi} . \quad (3)$$

Kut između prednje i stražnje površine označuje se sa  $\beta$  i zove se analogno kao kod tokarskog alata kut klina (kut oštrenja).

Kinematski kutevi  $\alpha_0$  i  $\gamma_0$  zavisni su kod jednog istog promjera svrdla još samo od posmaka po okretaju  $f$ .

Kod dosta velikog posmaka može nastupiti slučaj da se kinematski stražnji kut  $\alpha_0$  smanji na nulu, a to je kada  $\varphi=\alpha$  pa postaje:

$$\alpha_0 = \alpha - \varphi = 0 . \quad (4)$$

To je granica preko koje se posmak ne može više povećavati, ako se ne želi upropastiti svrdlo.

## 2.2. Geometrijski parametri odvajanog sloja kod bušenja

Na slici 6. prikazana je shema rezanja kod bušenja.

Širina odvojene čestice  $b$  kod bušenja:

$$b = \frac{D}{2\sin\varphi} . \quad (5)$$

Debljina odvojene čestice  $h$  koju skida svaka oštrica spiralnog svrdla:

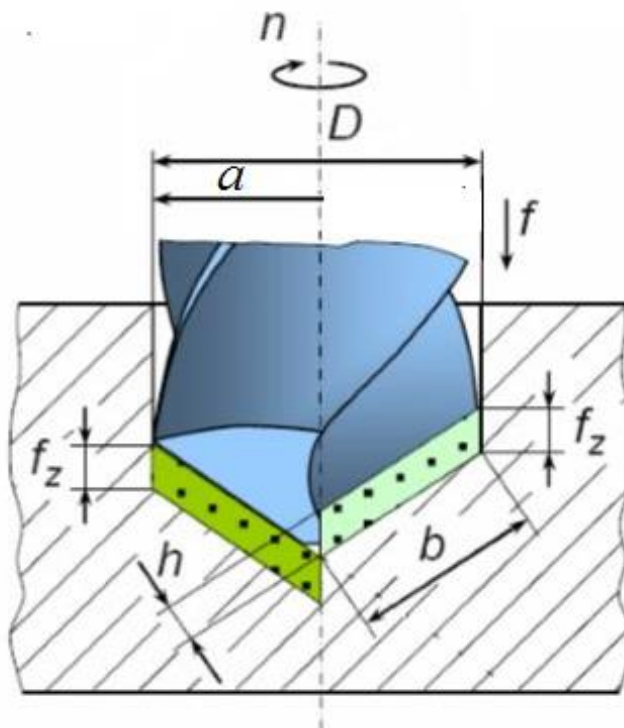
$$h = f_z \sin \varphi. \quad (6)$$

Površina poprečnog presjeka koju skine jedna oštrica  $A_1$  je jednaka:

$$A_1 = b * h = \frac{Df}{4}. \quad (7)$$

Ukupna površina poprečnog presjeka sloja materijala koji se obradi spiralnim svrdlom:

$$A = 2 * A_1 = \frac{Df}{2}. \quad (8)$$

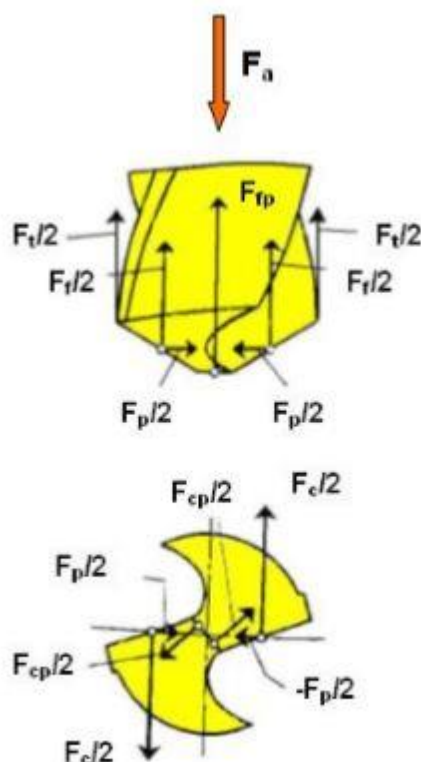


Slika 6. Prikaz elemenata rezanja kod bušenja [5]

### 2.3. Sile rezanja kod bušenja

Sila rezanja kojom alat djeluje na obradak pri bušenju određena je silama koje djeluju na svakoj reznjoj oštrici. Kod normalnog, pravilnog rada kod svih je alata poprečni presjek odvojenih čestica na svakoj reznjoj oštrici jednak pa su zato i jednake sile rezanja. Ako se promatra samo jedna oštrica, moguće je silu rezanja rastaviti u tri komponente, na način kao i kod postupaka sa jednoreznim alatima.





Slika 7. Sile rezanja koje djeluju na spiralno svrdlo [4]

Na svaku glavnu oštricu svrdla djeluju dvije jednake glavne sile rezanja  $F_c/2$ , ali suprotnog smjera, dvije jednake i isto usmjerene posmične sile rezanja  $F_f/2$  i dvije jednake, ali suprotno usmjerene natražne sile rezanja  $F_p/2$ . Na poprečnoj oštrici djeluju dvije jednake, ali suprotno usmjerene glavne sile rezanja poprečne oštrice  $F_{cp}/2$  i posmična sila rezanja poprečne oštrice  $F_{fp}$ .

Na svaki rub svrdla djeluje sila trenja ruba o obrađenu površinu  $F_t/2$  u pravcu osi svrdla.

U uslovima simetričnosti glavnih oštrica svrdla, natražna sila  $F_p/2$ , koja djeluje u smjeru okomitom na os svrdla, jednaka je nuli jer sile idu kroz os svrdla i međusobno se poništavaju te stvaraju samo naprezanje u materijalu.

Sve sile kojima materijal djeluje u smjeru osi svrdla savlada se sila posmaka  $F_a$  i ona je jednaka zbroju aksijalnih sila koje djeluju u osi svrdla:

$$F_a = F_f + F_{fp} + F_t. \quad (9)$$

Ukupni okretni moment  $M_u$ , kojim se opterećuju spiralno svrdlo, sastoji se od momenta  $M_{Fc}$  uslijed glavnih sila rezanja  $F_c$ , momenta  $M_{Fcp}$  izazvanog silama  $F_{cp}$ , koje djeluju na

poprečnoj oštrici i momenta  $M_{F_t}$ , od sila trenja  $F_t$  koje djeluju na cilindrične rubove svrdla, pa se dobije:

$$M_u = M_{F_c} + M_{F_{cp}} + M_{F_t}. \quad (10)$$

Na svaku glavnu oštricu svrdla djeluje glavna sila rezanja  $F_c$  koja se dobije:

$$F_c = \frac{D \cdot f}{4} \cdot f_f. \quad (11)$$

Budući da glavne sile rezanja  $F_c$  i  $-F_c$  djeluju približno na odstojanju  $l_h = \frac{d}{2}$ , javlja se spreg sila, odnosno moment  $M$

$$M = F_c \cdot \frac{D}{2} = \frac{D^2 \cdot f}{4} \cdot f_f. \quad (12)$$

Prema Condronsu je  $F \approx (0,7 \text{ do } 0,9) F_c$ , ali se radi sigurnosti i uzimanja u obzir poprečne oštrice može uzeti  $F \approx F_c$ . Ako je svrdlo nesimetrično naoštreno, nastaje manja rezultanta koja vuče svrdlo radijalno u stranu. Posljedica toga je nešto veći provrt, nego što je promjer svrdla.

Novija istraživanja govore, da posmične sile djeluju na odstojanju:

$$l_s = \frac{d}{3}.$$

Za izračunavanje glavne sile  $F_c$  upotrebljava se za ishodište jednažba koja se uzima kod postupaka s jednoreznim alatima:

$$F_c = A \cdot f_f. \quad (13)$$

Gornju jednažbu lako se uzima i za izračunavanje posmične sile  $F_f$ :

$$F_f = A \cdot f_{ff}, \quad (14)$$

gdje je:

$A$  – poprečni presjek odvojene čestice u  $m^2$ ,

$f_f$  – specifična rezna sila za računanje glavne sile u MPa,

$f_{ff}$  – specifična rezna sila za računanje posmične sile u MPa.

## 2.4. Elementi režima obrade kod bušenja

Dubina rezanja pri bušenju u punom materijalu, kako je prikazano na slici 6. je

$$a = \frac{D}{2}. \quad (15)$$

Posmak kod bušenja  $f$  je put koji obavi svrdlo ili obradak u pravu osi alata za jedan okretaj.

Posmak za jednu oštricu spiralnog svrdla ( $z=2$ ) jednak je  $f_z = \frac{f}{2}$ . (16)

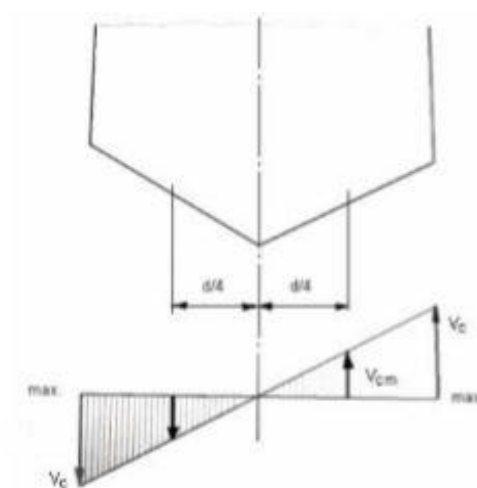
Posmak u jedinici vremena ili brzina bušenja izračuna se iz poznatog posmaka i broja okretaja svrdla .

$$v_f = f * n = f_z * z * n . \quad (17)$$

Pri bušenju dubokih provrta treba, uslijed otežanog odvođenja čestica materijala i smanjenja krutosti svrdla s povećanjem dubine bušenja, smanjiti posmak. Osim toga, potrebno je kod dubokih provrta povremeno izvlačiti svrdlo radi čišćenja njegovih utora.

Izbor posmaka, u principu, može se vršiti s obzirom na otpornost elemenata mehanizama za posmično gibanje, s obzirom na stabilnost sustava alat-alatni stroj-obradak i kad je u pitanju obrada veće dubine s obzirom na mogućnost odvođenja čestica metala. Navedeni mogući kriteriji za izbor veličine posmaka kod bušenja spiralnim svrdlom predstavljaju istovremeno i faktore koji ograničavaju njegovu veličinu.

Brzina rezanja  $v_c$  različita je na pojedinim radijusima spiralnog svrdla. U osi svrdla brzina je jednaka nuli, a na obodu ona je maksimalna, kako prikazuje slika 8. Kao brzina rezanja uvijek se uzima maksimalna brzina jer ona određuje vijek trajanja svrdla. Brzina rezanja izračunava se po jednadžbi  $v_c = D * \pi * n$ . (18)



**Slika 8. Brzina rezanja kod bušenja [4]**

Srednja brzina rezanja jednaka je brzini na radijusu  $d/4$ , te prema tome je :

$$v_{cm} = \frac{v_c + 0}{2} = \frac{v_c}{2}. \quad (19)$$

#### **2.4.1. Utjecaj različitih faktora na brzinu rezanja kod bušenja**

Napravilnije bi bilo izabrati dozvoljenu brzinu rezanja tako da proizađe iz vijeka trajanja alata. Prije toga mora se odlučiti želi li se optimalna ili ekonomska brzina rezanja.

Na brzinu rezanja, koju dozvoljava primijeniti svrdlo, utječu sljedeći faktori:

- materijal obratka,
- materijal reznog dijela svrdla,
- vijek trajanja svrdla,
- promjer svrdla,
- posmak,
- dubina bušenja,
- geometrija svrdla,
- hlađenje i podmazivanje.

Utjecaj promjera svrdla – kod istog vijeka trajanja i nepromijenjenih drugih uvjeta svrdlo većeg promjera dozvoljava veće brzine rezanja od svrdla manjeg promjera. To se objašnjava time što se većim promjerom svrdla povećava njegova masa, odvođenje topline je bolje, povećava se utor za odvođenje čestica materijala i dovođenje sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje do oštrica svrdla. Deformacije u radu su manje kod svrdla većeg promjera. Tanka i dugačka svrdla izložena su najviše deformacijama.

Utjecaj posmaka – posmak kod bušenja vrši na vijek trajanja svrdla i brzinu rezanja isti utjecaj kao i kod tokarenja, a to znači da s povećanjem posmaka, ako se zadržava isti vijek trajanja, mora se smanjiti brzina rezanja.

Utjecaj dubine izbušenog provrta – mnogobrojnim ispitivanjem ustanovljeno je da s povećanjem dubine bušenja vijek trajanja svrdla se smanjuje. To izazivaju promijenjeni uvjeti rada kod većih dubina bušenja, a koji se sastoji od:

- otežanog odvođenja stvorene topline,
- povećanja trenja između odvojenih čestica s utorima svrdla,

- otežanog odvođenja sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje do oštrica svrdla.

Utjecaj oblika brušenja svrdla – velika je primjena spiralnih svrdla kod obrade metala odvajanjem čestica. Nedostaci brušenja vrše veliki utjecaj na trošenje i vijek trajanja, a preko toga i na brzinu rezanja za promatrano svrdlo.

Utjecaj hlađenja – primjena tekućine za odvođenje topline stvorene pri bušenju nije manje važna nego pri tokarenju. Osobito je važna primjena hlađenja pri bušenju metala.

### 2.4.2. Snaga stroja pri bušenju

Izračunavanje potrebne snage za bušenje vrši se slično kao pri tokarenju, s time da se u jednadžbu uvodi srednja brzina rezanja  $v_{cm}$ , jer u hvatištu sile koja savladava posmak  $F_a$  nema brzine:

$$v_c = D * \pi * n, \quad (20)$$

koja se uzima kao brzinu rezanja, već se uzima brzina  $v_{cm} = v_c * \frac{l_h}{D}$ . (21)

Pri bušenju u puno je  $l_h = \frac{D}{2}$ .

Snaga pri bušenju provrta računa se prema jednadžbi:

$$P_B = \frac{F_c * v_{cm}}{\eta}. \quad (22)$$

Ako se u gornju jednadžbu za bušenje u puno unese za  $v_{cm}$ :

$$v_{cm} = \frac{v_c}{2} = \frac{D * \pi * n}{2}, \quad (23)$$

snaga pri bušenju u puno je:

$$P_B = \frac{F_c * v_c}{2 * \eta} = \frac{2 * M_{Fc} * v_c}{\eta * D}. \quad (24)$$

Pri izboru režima obrade (brzine rezanja, posmaka, promjera svrdla) mora se paziti da  $P_B$  (snaga pogonskog elektromotora) ne prekorači vrijednost za predviđeni rad.

Iz izmjerene bruto snage (s vatmetrom) dobije se za bušenje u puno prema jednadžama (24), (14) i (13)

$$P_B = \frac{f_f * A * v_c}{2 * \eta} = \frac{f_f}{\eta} * \frac{D * f * v_c}{4}. \quad (25)$$

## 2.5. Trošenje i zatupljenje svrdla

U procesu bušenja rezni se dio alata nakon nekog vremena troši. Trošenje svrdla može se pojaviti u dva oblika:

- potpuno istrošenje (lom oštrice),
- relativno istrošenje, kod kojeg se učinak alata toliko smanjio da nastupaju teškoće kod daljnjeg rada.

Potrebno je odrediti kada je svrdlo istrošeno u takvom obujam da je potrebno ponovno brušenje.

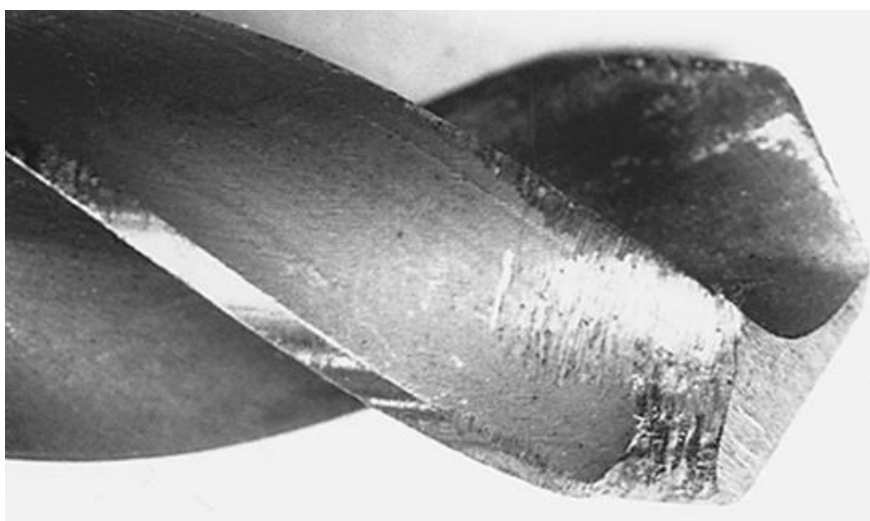
Svrdla se troše kao rezultat trenja stražnje površine alata o površinu rezanja, odvojenih čestica o prednju površinu u pravcu ruba svrdla te ruba alata o površinu provrta i gnječenja poprečne oštrice.

U slučaju trošenja ruba svrdla dolazi do naglog povećanja momenta, dok se sila posmaka neznatno povećava.

U slučaju trošenja poprečne oštrice dolazi do brzog porasta posmične sile, a u manjem stupnju se povećava moment.

Kod trošenja na uglovima nastaje povećanje momenta i posmične sile.

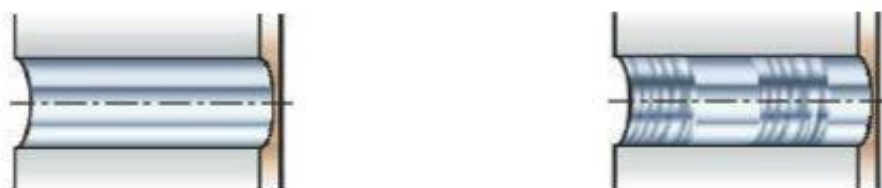
Najnepovoljniji je vid trošenja istrošenje uglova i ruba svrdla, kako prikazuje slika 9, jer su brzine rezanja na tim mjestima najveće. Kad je posmak manji i istrošenje svrdla je manje.



**Slika 9. Prikaz trošenja ruba spiralnog svrdla [8]**

## 2.6. Odvojena čestica

Formiranje odvojenih čestica i odvođenje odvojenih čestica iz zone rezanja ključni su problemi kod bušenja, a ovise o materijalu koji se obrađuje, geometriji reznog alata, pritisku i količini sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje te parametrima rezanja. Oblik odvojenih čestica prihvatljiv je kada se one mogu odvesti iz zone rezanja bez poteškoća, tj. bez zaglavljivanja kako prikazuje slika 10.



**Slika 10. Provrt s dobrim odvođenjem odvojenih čestica (lijevo) i provrt s lošim odvođenjem odvojenih čestica (desno) [9]**

Oblik odvojenih čestica povezan je s brzinom rezanja i posmakom kao što je prikazano na slici 11.



**Slika 11. Ovisnost odvojenih čestica o posmaku i brzini rezanja [9]**

### **3. HLAĐENJE, ISPIRANJE I PODMAZIVANJE PRI REZANJU**

#### **3.1. Efekti primjene**

Upotreba sredstava s rashladno-mazivim svojstvima daje niz korisnih efekata u procesu rezanja. Ova sredstva doprinose ekonomičnoj proizvodnji i postizanju zahtjevane točnosti i čistoće površine, tj. osnovnom cilju obrade. Primjena ovih sredstava neophodna je u većini slučajeva rezanja. Poboljšanje uvjeta obrade rezanjem primjenom određenog sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje uspostavlja se kroz sljedeće efekte:

- povećanje postojanosti alata,
- poboljšanje čistoće i osobina obrađene površine,
- smanjenje sile, temperature i snage rezanja,
- poboljšanje odvođenja odvojenih čestica.

Primjena sredstava za hlađenje, ispiranje i podmazivanje može izazvati i negativne efekte:

- efekt na izradak (korozijska površina),
- efekt na stroj (nagrizanje kliznih površina i ležaja),
- nepostojanost kod upotrebe (blokiranje razvodnog sustava pri dužem stajanju),
- efekt na radnike (nastanak dima, neugodnog mirisa, oštećenja kože),
- troškove za sredstva i razvodni sustav koji su veći od koristi dobivenih poboljšanjem uvjeta obrade.

#### **3.2. Svojstva sredstava za hlađenje, ispiranje i podmazivanje**

Sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje moraju imati određena svojstva da bi se korisno mogla primijeniti. Svojstva trebaju omogućavati postizanje efekata za poboljšanje obrade i eliminiranje većine negativnih efekata. Sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje zahtijevaju svojstva kao što su:

- dobro podmazivanje, tj. smanjenje trenja,
- dobro hlađenje, tj. odvođenje topline,
- smanjenje naprezanja smicanja u materijalu,
- dobro prihvaćanje za metal i sposobnost emulgiranja,
- antikorozivnost i antitoksičnost,
- postojanost u upotrebi.



Sredstva imaju veću sposobnost hlađenja što je veća njihova toplinska provodljivost, specifična toplina i latentna toplina isparavanja. Budući da pri rezanju metala vladaju visoki pritisci i temperature, upotrijebljeno sredstvo mora posjedovati svojstva otpornosti prema opterećenjima. To se postiže stvaranjem čvrstih mazivih filmova čije se stvaranje pospješuje prisustvom površinski aktivnih substanci. Takve supstance mogu biti organske (biljno-uljne ili životinjske masti) ili anorganske (sulfidi i kloridi). Organske materije čvrsto prijanjaju na metalnu površinu i tako tvore mazivi film. Anorganske materije stupaju i u kemijsku reakciju s metalnom površinom ili oksidnim slojem na njoj. Ovaj efekt podmazivanja utječe na povećanje postojanosti alata.

Sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje dolaze pri rezanju u kontakt s alatom samo na mjestima u kontaktnoj zoni, gdje je nastao vakuum pri kidanju naslage ili naljepaka na alatu, odnosno pri manjim brzinama rezanja kada između odvojenih čestica i noža mogu biti mjesta bez dodira. Ako komponente fluida stvaraju kemijsku vezu s materijalom alata, može nastupiti kemijsko habanje. Stvoreni krhki filmovi pod visokim se opterećenjima lome te se ubrzava habanje i postiže suprotan efekt.

Prodirlanjem sredstva u mikropukotine rasijsca se materijal izratka, što dovodi do smanjenja sila razdvajanja među atomima fluida te je rezultat toga smanjenje naprezanja smicanja u materijalu izratka. Na taj je način smanjenja sila rezanja, a naročito u slučaju rezanja tankih odvojenih čestica srednjim brzinama rezanja.

### 3.3. Vrste sredstava i primjena

Sva sredstva koja se danas koriste mogu se podijeliti u dvije osnovne skupine:

- sredstva sa pretežnim efektom hlađenja,
- sredstva s pretežnim efektom podmazivanja.

Prvoj grupi pripadaju sredstva s malom viskoznosti, ali velikom mogućnosti primitka i prevođenja topline. Tu spadaju vodeni rastvori elektrolita, vodene emulzije, plinovi (ugljični dioksid –  $\text{CO}_2$ ), pjena ugljične kiseline. Ova sredstva dobro hlade i time povećavaju postojanost alata. To je važno pri gruboj obradi kada se stvara mnogo topline, a hrapavost nije bitna. Emulzija je mješavina koja se sastoji od koloidnog rastvora organskih kiselina i sapuna u mineralnim uljima, pomiješanog s vodom ili vodom i alkoholom. U emulziji je obično 2 do 20% ulja i 0,3-2% sapuna. Emulzije s vodom imaju mliječno bijelu do smeđu boju. Sastav emulzije može biti različit. Često se emulziji dodaje i čvrsto tijelo za bolje hlađenje, npr.

aluminijски prašak. Za istovremeno hlađenje, ispiranje i podmazivanje koriste se aktivne kašaste emulzije, i to sulfirane emulzije te emulzije na bazi sintetičkih masnih kiselina s posebnim sastavom.

U drugoj skupini nalaze se sredstva koja služe za podmazivanje pri rezanju. Ova sredstva koriste se u završnim operacijama, za postizanje visoke točnosti i čistoće površine. Tu spadaju:

- mineralna ulja,
- biljna ulja (maslinovo, sojino, repičino, ricinus itd.),
- životinjska ulja (ulja i masti sisavaca i riba),
- kompaundirana ulja (mješavina mineralnih, biljnih i životinjskih ulja i masti),
- petrolej (kerozin),
- sredstva s površinski aktivnim substancama u ulju i kerozinu,
- sulfirana ulja sa sadržajem sumpora kao aktivnog sredstva za stvaranje mazivih filmova na površini noža.

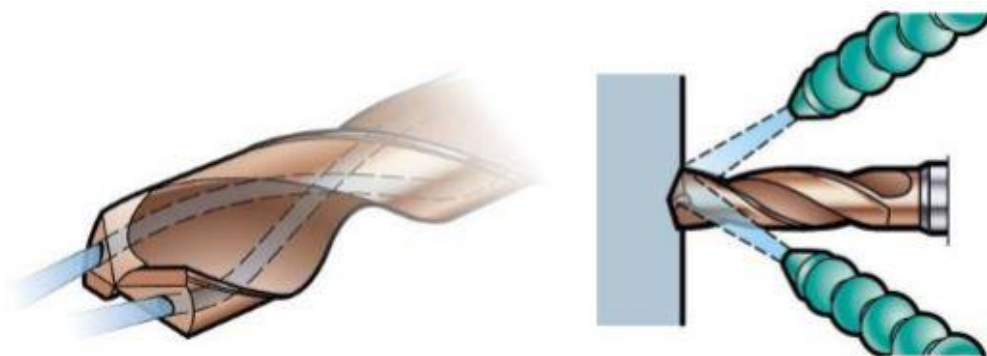
U ovu grupu sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje spadaju i čvrsta maziva kao grafit, talk, parafin i molibdensulfid ( $\text{MoS}_2$ ). Čvrsta maziva koriste se tamo gdje nije moguće podmazivati uljima i mastima.

### 3.4. Način dovodenja sredstava kod bušenja

Kontinuirani mlaz sredstva treba se pustiti prije početka rezanja, usmjeren u zonu rezanja gdje se razvija najveća moguća toplina. Jedino se tako može postići puna efikasnost upotrebe sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje. Ovo vrijedi za obrade na otvorenim strojevima gdje je nepoželjno prskanje rashladno mazivog sredstva. Međutim, još bolji rezultat postiže se dovodenjem sredstva pod pritiskom, ali je uvjet da se to događa u zatvorenom prostoru obrade. Postoje dva načina dovodenja SHIP-a u zonu rezanja koja su prikazana na slici 12, a to su:

- dovodenje kanalima kroz tijelo alata i
- vanjsko dovodenje između tijela alata i stijenke provrta.

Dovodenje SHIP-a kroz tijelo alata koristi se za izbjegavanje uglavljivanja odvojenih čestica i pri bušenju dubljih provrta.



**Slika 12.** Svrđlo s kanalima za SHIP (lijevo) i  
svrdlo sa vanjskim dovođenjem SHIP-a (desno) [9]

## 4. DUBOKO BUŠENJE

Dubokim bušenjem smatra se bušenje provrta duljih od 10 promjera. Reznim alatima za duboko bušenje može se postići dubina od 150 promjera. Postoji više konstrukcijskih varijanti svrdla za duboko bušenje. Sve su one namjenjene za bušenje dugih otvora.

U tijeku ove operacije javljaju se posebni problemi u vezi hlađenja zone rezanja, odvođenja odvojenih čestica i krutošću alata, zbog toga je razvijeno više postupaka dubokoga bušenja. Ovi problemi rješavaju se tako što se u zonu rezanja dovode obilne količine SHIP-a. Tekućina je pod pritiskom i putuje prema zoni rezanja kroz posebne kanale izrađene u tijelu svrdla. Povratni je tok tekućine prostor između tijela svrdla i obrađene površine te tako tekućina nakon hlađenja oštice alata i zone rezanja zahvaća odvojene čestice koje nosi sa sobom u tijeku svog povratnog hoda.

Postupci dubokog bušenja:

- bušenje provrta STS postupkom,
- bušenje ejektorskim postupkom,
- bušenja provrta topovskim svrdlom,
- bušenje provrta specijalnim spiralnim svrdlom.

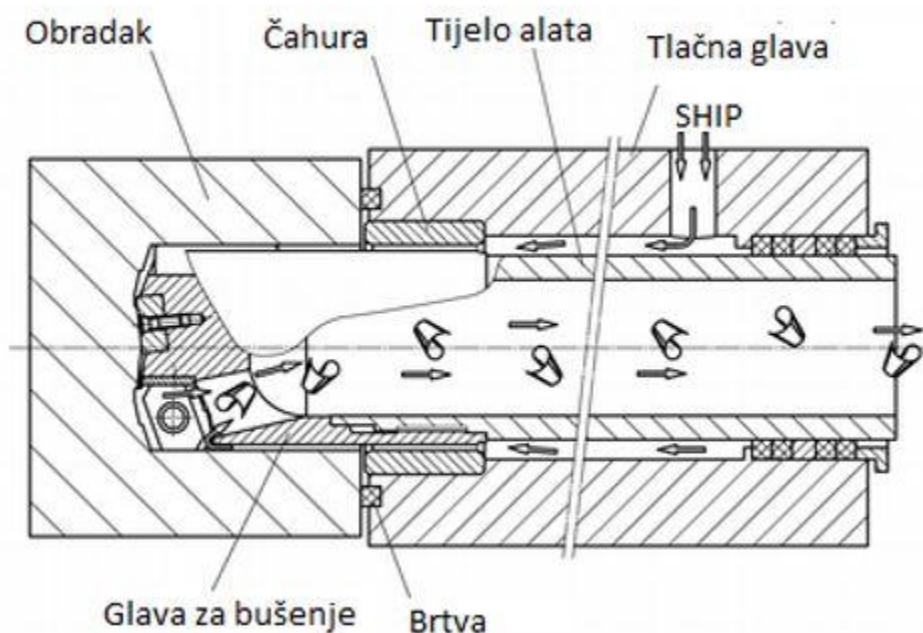
Zadnja dva spomenuta postupka detaljnije su obrađena jer se koriste u izradi provrta u kalupu za izradu staklenih boca.

### 4.1. STS postupak dubokog bušenja provrta

STS (eng. Single tube system) postupak dubokog bušenja provrta, prikazan na slici 13, povoljan je za visoko serijsku proizvodnju. Da bi se moglo duboko bušiti ovim postupkom, potreban je poseban stroj. Iz tog je razloga produktivnost povećana šest puta naspram dubokog bušenja topovskim svrdlom. Koristi se kod materijala s lošim svojstvima odvajanja čestica poput nehrđajućeg te nisko ugljičnog čelika.

STS postupak funkcionira tako da se SHIP dovodi izvana, a odvojene čestice i SHIP se odvođe unutarnjim provrtom. Rezna glava je pričvršćena na cilindrično tijelo manjeg promjera što ostavlja prostor između provrta i tijela alata kao što je prikazano na slici. SHIP se dovodi pod tlakom te se na taj način odvođe odvojene čestice kroz unutrašnji provrt. Zahvaljujući takvome načinu odvođenja odvojenih čestica, nisu potrebni žljebovi s vanjske strane alata za

odvođenje odvojenih čestica tako da presjek tijela alata može biti puni, što dovodi do puno veće krutosti nego pri dubokom bušenju s topovskim svrdlom.



**Slika 13. STS postupak bušenja [5]**

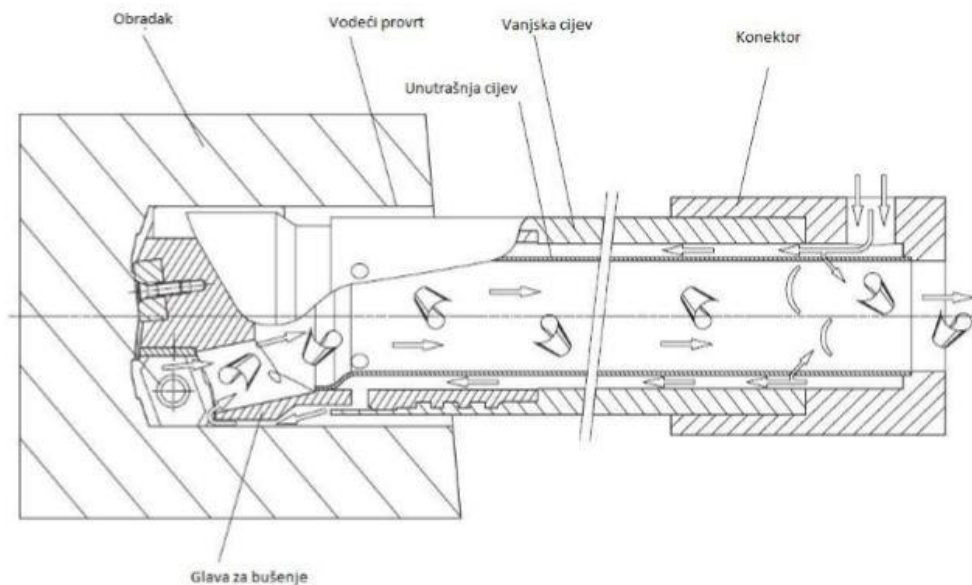
STS i BTA postupci dubokog bušenja identični su po principu rada te se samo razlikuju po imenu kod raznih proizvođača. STS naziv koriste proizvođači alata Sandvik i Iscar, dok BTA naziv koristi poduzeće Botek.

#### **4.2. Duboko bušenje ejektorskim postupkom**

Ovaj je tip postupka modifikacija STS odnosno BTA postupka dubokog bušenja. Isti, za razliku od navedenih, zahtijeva brtvljenje.

Duboko bušenje ejektorskim postupkom pogodno je za primjenu na obradnim strojevima s horizontalnim vretenom. Ovakav postupak ne zahtijeva brtvljenje između obratka i alata jer se SHIP dovodi pod pritiskom između unutarnje i vanjske cijevi, a odvojene čestice i SHIP se odvođe kroz unutarnju cijev, kao što je prikazano na slici 14. Na unutrašnjoj su cijevi pored toga izrađeni kosi provrti kroz koje jedan dio SHIP-a prodire u unutrašnju cijev neposredno po ulasku u međuprostor ovih cijevi. Upravo strujanje SHIP-a kroz te provrte i njegovo usmjeravanje i gibanje prema izlaznoj strani unutrašnje cijevi stvara određeni potlak na prednjem dijelu cijevi. Taj potlak djeluje na struju SHIP-a, koja dolazi u zonu rezanja, čineći je tako mnogo efikasnijom u smislu odvođenja odvojenih čestica. Dubine rezanja koje se mogu

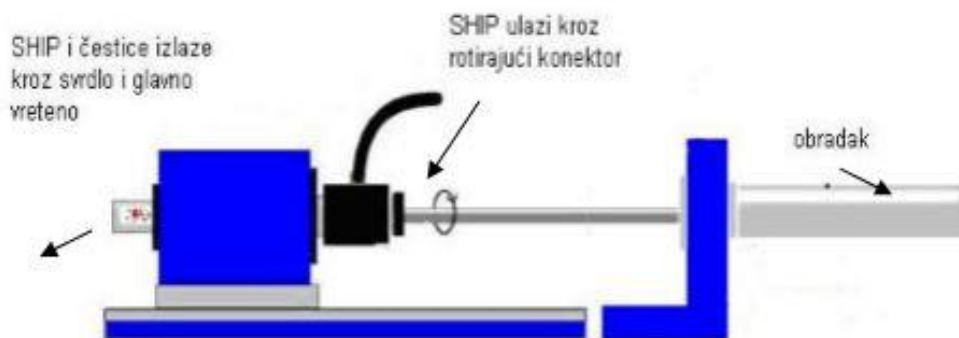
dostići su do 150 promjera. Ovakav se postupak dubokog bušenja u programu Iscar-a naziva DTS (Dual Tube System).



Slika 14. Ejektorsko bušenje [5]

#### 4.3. Duboko bušenje provrta topovskim svrdlom

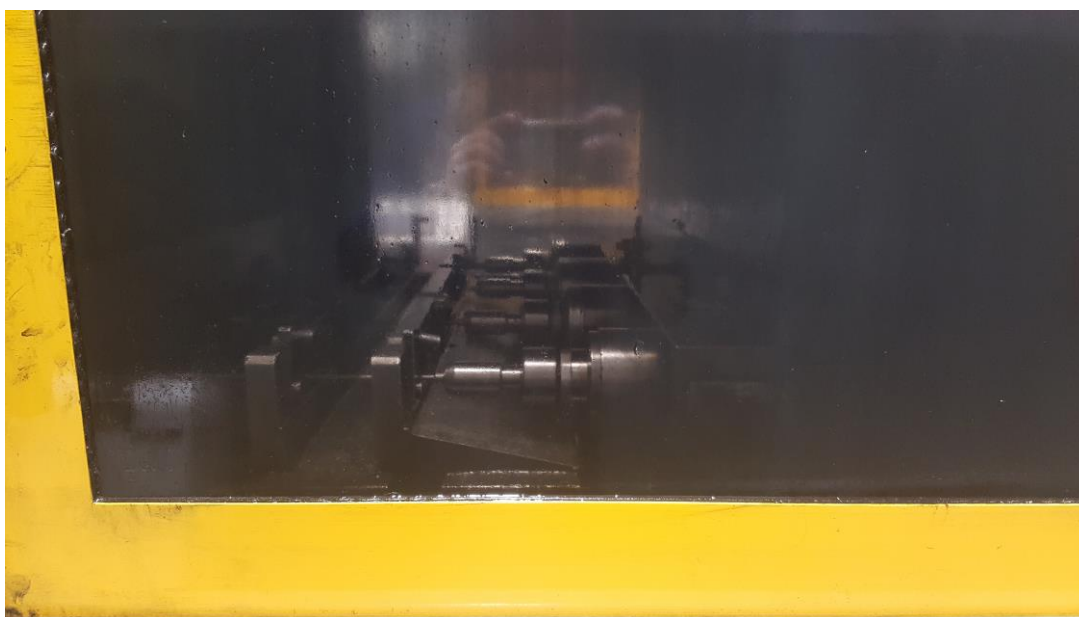
Duboko bušenje provrta topovskim svrdlom je postupak koji se koristi u izradi provrta u kalupima za izradu staklenih boca. Mogu se bušiti manji provrti nego STS postupkom. Za izvođenje ovog postupka dubokog bušenja potrebni su specijalni strojevi namijenjeni za duboko bušenje topovskim svrdlom. Princip bušenja topovskim svrdlima, koji je prikazan na slici 15, jest da se alat sastoji od utora u obliku slova V uzduž svoje dužine i karbidnog reznog alata konstruiranog na takav način kao da proizvodi svoj vlastiti vodič blazinice dok buši provrt.



Slika 15. Princip bušenja topovskim svrdlom [5]

Tekućina za hlađenje, ispiranje i podmazivanje pod visokim tlakom dovodi se u sredinu cijevi bušećeg svrdla preko osovine stroja za topovsko bušenje da pomogne u odvajanju i odvođenju čestica duž V-utora alata i van iz izbušenog provrta. Duboko bušenje topovskim svrdlima omogućuje tolerancijski točni ravni provrt u dopuštenom odstupanju s izvrsnom površinskom obradom. Kod dubokog bušenja topovskim svrdlima provrta u kalupu za izradu staklenih boca, najčešće se koriste topovska svrdla s jednom oštricom poduzeća TIEFBOHRTECHNIK. Postoje i topovska svrdla s dvije oštrice. Međutim, ona se ne koriste kod dubokog bušenja provrta u kalupima zbog veće cijene od topovskih svrdala s jednom oštricom i zbog toga što topovska svrdla s jednom oštricom zadovoljavaju sve postavljene zahtjeve kod izrade provrta u kalupima za izradu staklenih boca.

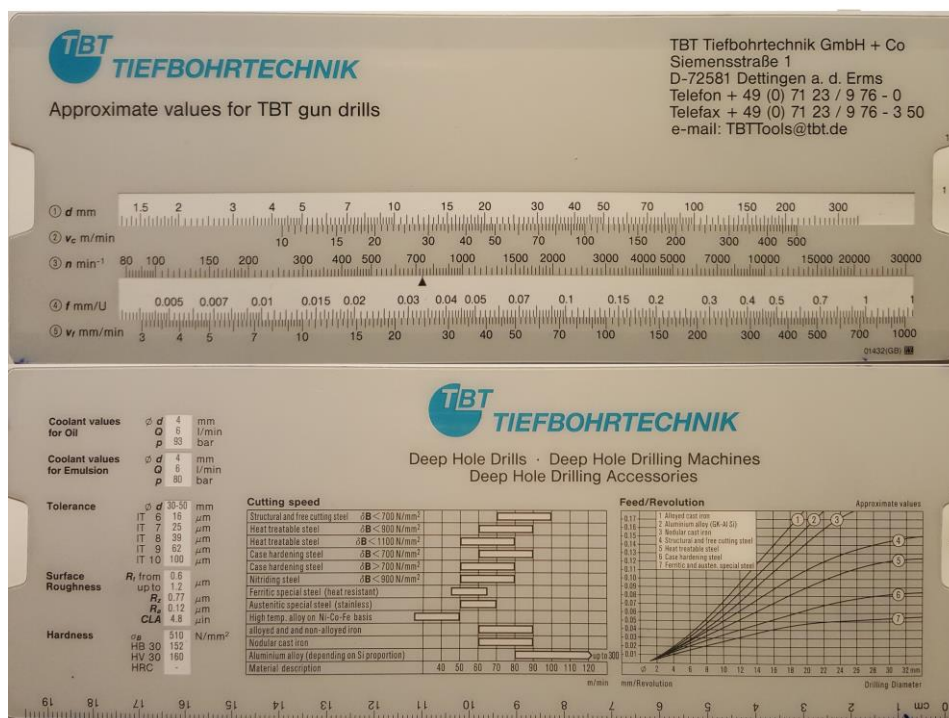
Topovska svrdla su jedna od sporijih operacija bušenja provrta u kalupu za izradu boca te se zbog toga radnja vrši na četiri kalupa istovremeno kao što je prikazano na slici 16.



**Slika 16. Primjer dubokog bušenja topovskim svrdlom**

Buše se s posmakom oko 50 mm/min, dok je brzina rezanja  $v_c$  oko 65 m/min. Aproximirane vrijednosti režima obrade za topovska svrdla poduzeća TIEFBOHRTECHNIK mogu se približno odrediti putem kliznog kataloga za izbor režima obrade, koji je prikazan na slici 17. Što se tiče materijala obratka, topovskim svrdlima rade se provrti u kalupima od sivog i nodularnog lijeva.





Slika 17. Klizni katalog za izbor režima obrade

#### 4.3.1. Jednoredna topovska svrdla

Jednoredna topovska svrdla, prikazana na slici 18, alati su za duboko bušenje s visokim performansama koji su dostupni u promjerima koji se kreću u veličinama 2 mm – 50 mm s duljinom V-utora do 1500 mm. Topovska svrdla dopuštaju precizno bušenje provrta dubine do 55 promjera, pa čak i više od toga. Karbidni slojevi pomažu optimiranju oblika odvojenih čestica i njihovo odvođenje tijekom procesa bušenja provrta. Sredstvo za hlađenje, ispiranje i podmazivanje pod visokim tlakom dovodi se kroz centralni provrt topovskog svrdla i isto tako omogućava podmazivanje i pomaže u odvođenju odvojenih čestica. Topovska svrdla mogu se koristiti u raznim tokarskim i glodaćim centrima koji su opremljeni dovoljnom količinom SHIP-a i sustavom filtriranja.



Slika 18. Jednoredna topovska svrdla poduzeća TIEFBOHRTECHNIK [6]



#### 4.3.2. Dvorezna topovska svrdla

Dvorezno topovsko svrdlo alat je s dvostrukom oštricom i dvostrukim kanalom za dovođenje SHIP-a pod pritiskom. S ovim alatom, moguća je dubina bušenja od 40 promjera, a dostupni su u promjerima koji se kreću u veličinama 5,5 mm – 25 mm. Veće mjere penetracije moguće je postići s dvoreznim topovskim svrdlima nego s jednoreznim u određenim materijalima. Raznolikost karbidnih slojeva dostupna je za različite aplikacije korisnika. Sredstvo za hlađenje, ispiranje i podmazivanje dovodi se kroz središnji dio topovskog svrdla. Sredstvo za hlađenje, ispiranje i podmazivanje i mješavina čestica vraća se kroz cijev okna topovskog svrdla. Konstrukcija dvoreznog topovskog svrdla može se koristiti na centru za strojnu obradu, centru za oblikovanje i raznim strojevima za posebne namjene. Sustav sa SHIP-om pod visokim tlakom sa filtracijom nužan je za bušenje uskih provrta.

Kruta karbidna svrdla do veličine 12 promjera ne zahtijevaju predprovrt za svrdlo (kirner provrt) i isto tako ne zahtijevaju blazinicu. Za provrte reda veličine preko 20 promjera, karbidno zašiljeno topovsko svrdlo tipično se koristi na strojevima za duboko bušenje i strojevima s posebnom namjenom. Ovi alati uvijek će trebati predprovrt ili blazinicu.

Dvorezna topovska svrdla za duboko bušenje imaju iste prednosti kao jednorezna topovska svrdla za duboko bušenje. Dvorezna topovska svrdla, prikazana na slici 19, za duboko bušenje proizvode se i dostupna su sve do 6mm promjera.



Slika 19. Dvorezno topovsko svrdlo poduzeća TIEFBOHRTECHNIK [6]

#### 4.4. Duboko bušenje provrta specijalnim spiralnim svrdlom

Spiralno svrdlo najzastupljeniji je rezni alat za bušenje, a najčešće ima dvije rezne oštrice. Ovisno o tipu i namjeni svrdla, spiralno svrdlo može imati i više reznih oštrica. Također može sadržavati kanale kroz koje se dovodi SHIP u slučaju da se prilikom obrade koristi unutarnje hlađenje. Unutarnje hlađenje koristi se pri bušenju dubina većih od 5 promjera. Spiralna svrdla dijele se prema materijalu, dužini, obliku, broju oštrica, geometriji vrha i načinu stezanja. Za određenu primjenu svrdlo se odabire na temelju materijala koji se obrađuje, dimenzijama i vrsti provrta (slijepi ili prolazni provrt), buši li se u puno ili se proširuje, ulaznim i izlaznim karakteristikama provrta, zahtjevima o kvaliteti obrađene površine i uvjetima rezanja. Svi navedeni parametri jednako su važni prilikom odabira odgovarajućega svrdla za određenu operaciju. Razvojem tehnologije i znanja skupljenim od strane proizvođača svrdla, za svaku operaciju postoji određeno svrdlo koje je namijenjeno za to. Postoje tri tipa konvencionalnih svrdla - svrdla koja se bruse, svrdla s izmjenjivim vrhom te svrdla s izmjenjivim pločicama. Normalna spiralna svrdla dijele se prema obliku i broju reznih oštrica, kutu žlijeba, izgledu vrha, debljini jezgre i širini oštrice na rubu svrdla (faza).

Ovaj postupak dubokog bušenja se sve više koristi kod izrade provrta u kalupu za izradu staklenih boca. Koriste se spiralna svrdla s dvije oštrice s dovodom emulzije pod velikim pritiskom 40-70 bara kroz kanale koji su izrađeni u samom tijelu svrdla. Primjer jednoga takvoga svrdla prikazan je na slici 20. Spiralna svrdla skraćuju do 80% vrijeme obrade u odnosu na jednorezna topovska svrdla. Bušenje se izvodi do duljine 40 promjera bez prekida posmaka. Koriste se razni proizvođači ovisno o duljini provrta koji se buši. Za bušenje provrta u kalupu za izradu staklenih boca koriste se:

- spiralna svrdla (XD Technology) poduzeća WALTER (Titex) koja su raspoloživa u rasponu promjera svrdla 3-10 mm, a buše se provrti duljine 20-70 promjera,
- spiralna svrdla poduzeća CERATIZIT koja su raspoloživa u rasponu promjera svrdla 2,40-45 mm, a buše se provrti duljine 40-50 promjera i
- spiralna svrdla poduzeća CAJHEN koja su raspoloživa u rasponu promjera svrdla 3-12 mm, a buše se provrti duljine 20-30 promjera, isto kao i kod poduzeća WALTER.

Spiralna svrdla s dovodom emulzije koriste se kod izrade provrta u kalupima od bronce i moguće ih je koristiti na svim poznatim obradnim centrima. Svrdla imaju vrhunski polirane spiralne utore za odvođenje čestica pa izvlačenje prilikom bušenja nije potrebno. Pritisak

emulzije može se regulirati pomoću funkcije na stroju tijekom izvođenja programa izrade kalupa.



**Slika 20. Spiralno svrdlo poduzeća Walter Titex [10]**

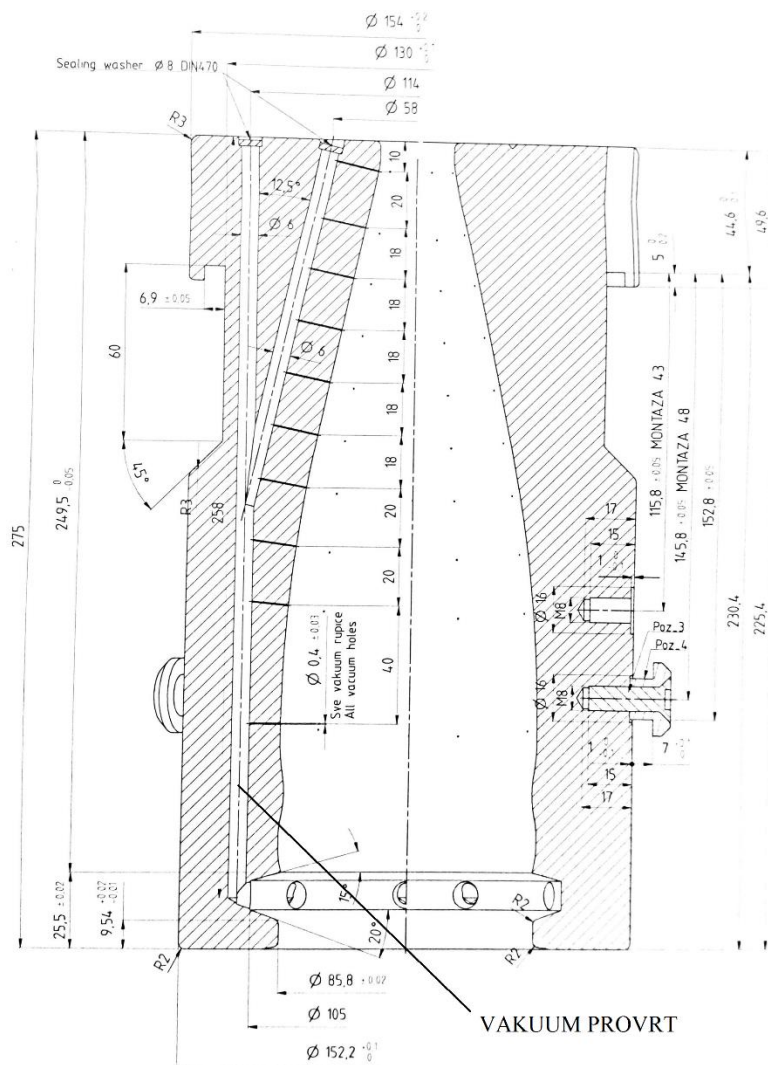
Kod izrade provrta u kalupu za izradu boca potrebno je obratiti pažnju na pilot provrt, koji se izrađuje kada je željena dubina veća od 12 promjera. Pilot provrt je mali provrt izbušen u kalupu koji kasnije omogućava lakše centriranje i vođenje većeg spiralnog svrdla kojim se izvodi duboko bušenje. Buši se pilot svrdlom koje je prikazano na slici 21, do dubine 3,5-8 promjera.



**Slika 21. Pilot svrdlo poduzeća Walter Titex [10]**

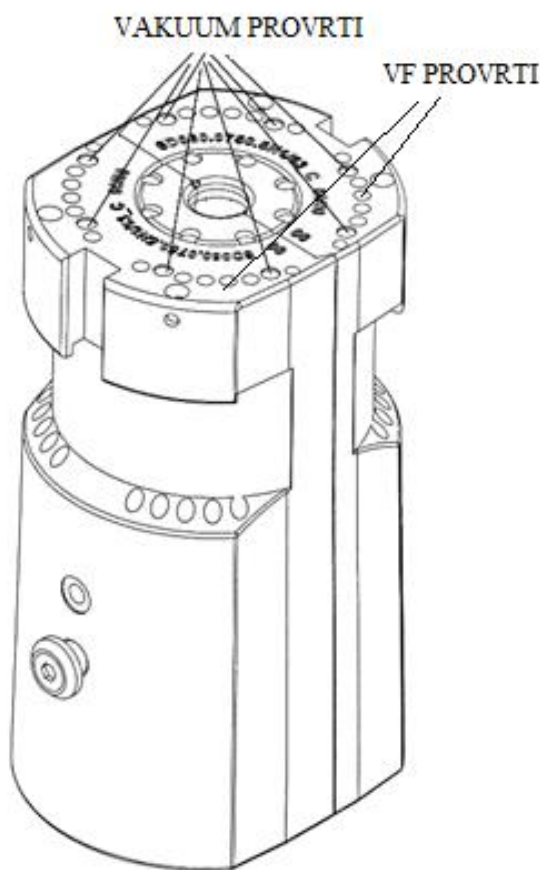
Bušenje u kalupima za izradu staklenih boca može se podijeliti na bušenje vakuum provrta, prikazanih na slikama 22 i 23, koje se mogu bušiti odjedanput i bušenje provrta u kalupu namijenjenih za hlađenje koji se buše s jedne strane do pola, pa se kalup okrene za 180° te se operacija bušenja ponavlja opet do sredine kalupa. Provrta za hlađenje (VF provrti), koji su prikazani na slici 23, koriste se kod izrade staklenih boca tako da kroz njih puše zrak pa time

hladi kalup. Vakuum provrti spojeni su na kraju kalupa na prizmu i na male provrte pa tijekom postupka izrade boca kroz njih vuče vakuum tako da staklo u tekućem stanju što bolje poprими oblik gravure.



**Slika 22. Prikaz presjeka kalupa**

Dva su razloga zašto se bušenje VF provrta obavlja u dva koraka. Jedan razlog je taj da prilikom bušenja na velike dubine dolazi do izvijanja, odnosno pomaka središta svrdla u odnosu na početnu točku bušenja. Kad bi se bušenje odvijalo kroz cijelu duljinu kalupa, svrdlo bi izašlo na pogrešnoj točki što bi dovelo do preklapanja provrta ili do izlaska van na bočnoj strani kalupa. Drugi razlog je taj što se u većini slučajeva koriste spiralna svrdla od 30 promjera, a kalup je većinom duljine 200-350 mm pa bi svrdla bilo prekratka.



**Slika 23. Prikaz vakuum provrta i VF provrta na kalupu**

Bušenje provrta u kalupima od bronce obavlja se u nekoliko koraka. Bitan korak je namještanje kalupa na postolje koje se sastoji od gornjeg i donjeg dijela u obliku slova V. Istovremeno se stežu dva kalupa jer se koristi stroj s dva vretena, kako je prikazano na slici 24. Zatim bi ticalo stroja trebalo obaviti mjerenje kako bi se dobili položaji kalupa i njihovo središte. Ticalo bi mjerilo gornju pa donju te zatim lijevu i desnu točku središnjeg provrta kalupa. Potom bi se ticalo pomaknulo za duljinu kalupa i isto bi se mjerenje ponovilo na stražnjoj strani kalupa. Tim vrhunskih programera razvio je program koji uvelike skraćuje vrijeme mjerenja i proizvodnje. Tijekom programiranja u program se unose važne dimenzije za pojedini kalup, a budući da je postolje uvijek istog oblika i dimenzija, ticalu je potreban položaj samo prednje strane kalupa dok se onda ostatak preračunava preko programa.



Slika 24. Prikaz stezanja kalupa na postolje

#### 4.4.1. Walter Titex XD tehnologija

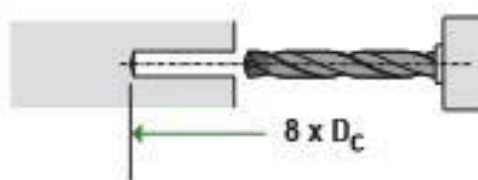
Proizvođač Walter Titex u svojem programu za bušenje nudi razna rješenja za poboljšanje produktivnosti. Jedno od njih je XD tehnologija svrdla. XD tehnologijom nastoji se postići nova geometrija s dužim sekundarnim kutom nagiba, dodatni aspekt zaštite kuta rezanja i maksimalna stabilnost svrdla tijekom bušenja. Produktivnost ovih svrdla puno je veća od topovskih svrdla za duboko bušenje. XD Technology svrdla tvrdometalna su svrdla s raznim presvlakama s unutarnjim hlađenjem, a mogu se bušiti kalupi od raznih materijala (P,M,K,N,S,H,O oznake materijala).



Slika 25. Usporedba XD tehnologije i topovskog svrdla [7]

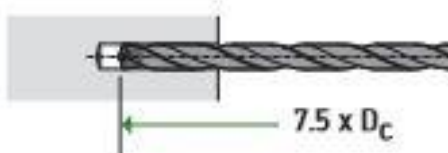
Postupak bušenja XD tehnologijom za materijale od obojenih metala izvodi se u 4 koraka. To su:

1. Pilotiranje – uključeno je dovođenje SHIP-a (emulzije) pod pritiskom od 10 do 30 bara. Dubina bušenja je do 8 promjera.



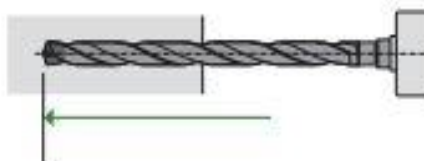
**Slika 26. Bušenje pilot svrdlom [7]**

2. Ulaz svrdla u prethodno izbušen pilot provrt – svrdlo ulazi do dubine 7,5 promjera s isključenim dovodom SHIP-a. Učestalost vrtnje koju XD tehnologija preporučuje kod ovog koraka je  $n_{\max}=100 \text{ min}^{-1}$ , dok posmična brzina iznosi  $v_f=1000 \text{ mm/min}$ .



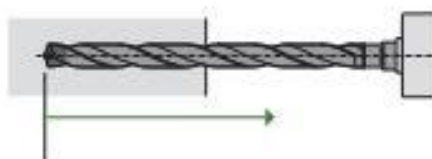
**Slika 27. Ulazak svrdla u pilot provrt [7]**

3. Duboko bušenje – izvodi se pod pritiskom emulzije od 10 do 30 bara do dubine do koje trebamo izvršiti bušenje. Preporučena učestalost vrtnje i posmična brzina iznose 100% mogućnosti stroja.



**Slika 28. Duboko bušenje do željene dubine [7]**

4. Vraćanje svrdla – dovod emulzije je isključen. Preporučena učestalost vrtnje i posmična brzina je kao u drugom koraku.



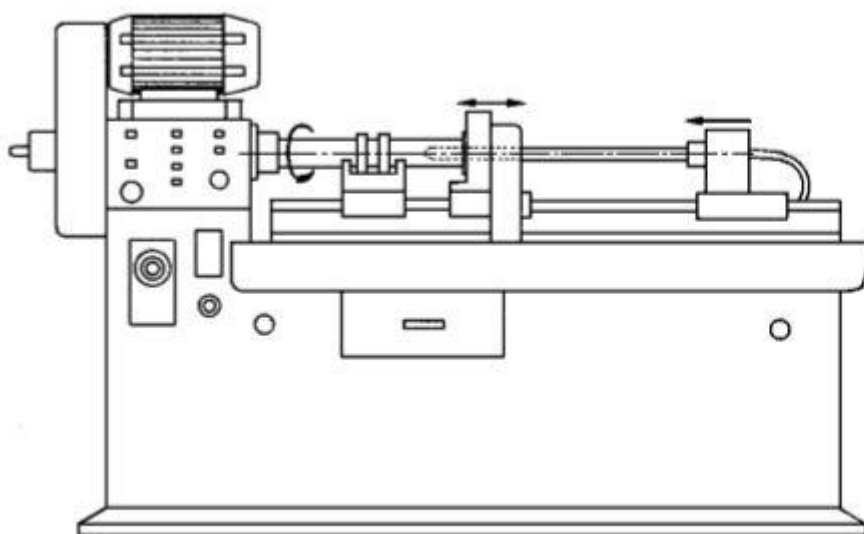
**Slika 29. Izlazak svrdla iz provrta [7]**

## 5. STROJEVI ZA DUBOKO BUŠENJE

Bušilice su alatni strojevi koji služe za bušenje, upuštanje, razvrtavanje, a u posebnim slučajevima i za ostale vrste obrade te za urezivanja navoja. Radno je gibanje kod bušilica rotacijsko, a izvodi ga alat. Ostala gibanja (posmak) obavlja alat ili izradak (zauzimanje pozicije). Prema namjeni i konstruktivnim osobinama bušilice se dijele u stolne, stupne, redne, revolverske, viševretene, radijalne, horizontalne, bušilice-glodalice, koordinatne, za duboko bušenje i za urezivanje navoja.

### 5.1. Ručno upravljanje bušilice za duboko bušenje

Duboko bušenje pripada skupu specijalnih operacija obrade bušenjem i obuhvaća izradu dubokih provrta (otvora) kod kojih je promjer relativno mali u odnosu na njihovu dužinu. Pri dubokom bušenju javlja se problem odvođenja odvojenih čestica i hlađenja zone rezanja. Ovaj se problem pri dubokom bušenju standardnim alatima (spiralna i slična svrdla) rješava tako što se svrdlo nakon određene dužine radnog hoda vraća u početni položaj (položaj prije početka bušenja), da bi se pri tome odvele odvojene čestice iz zone rezanja i dovelo sredstvo za hlađenje, ispiranje i podmazivanje u novu zonu. Prema tome, ovakav postupak dubokog bušenja temelji se na stalnom prekidanju procesa rezanja. Shema ručno upravljanoj stroja za duboko bušenje prikazana je na slici 30.



Slika 30. Shematski prikaz ručno upravljanoj stroja za duboko bušenje [4]



## 5.2. Numerički upravljani stroj-Mollart Omnisprint

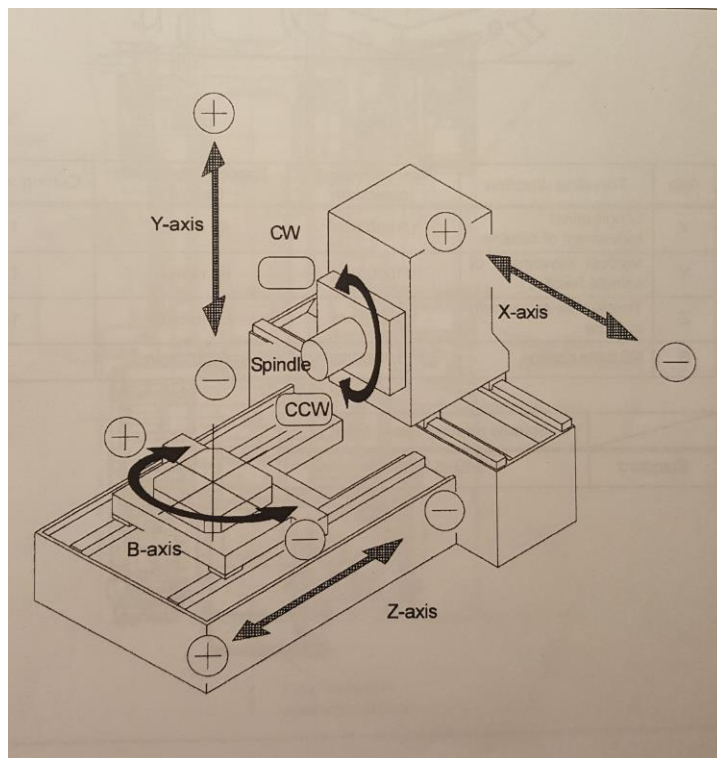
Mollart Omnisprint, prikazan na slici 31, je stroj napravljen specijalno za bušenje dubokih provrta i jedan je od klasičnih strojeva koji se koriste za postupak dubokog bušenja. Jednovretni stroj ima mogućnost bušenja provrta veličine od 2 do 25 mm, a dvovretni model od 2 do 15 mm. Trovretni stroj ima mogućnost bušenja provrta od 2 do 12 mm. Broj numeričkih upravljanih osi koje stroj sadrži su 3 i to X, Y, Z. Svi modeli, neovisno o broju vretena, imaju mogućnost bušenja dubine do 750 mm. Udaljenost koju može alat prijeći po X osi je 500 mm, dok po Y osi 300 mm. Brzina vrtnje vretena može ići u rasponu 0 - 6 000 min<sup>-1</sup> ili 0 - 12 000 min<sup>-1</sup>. Posmak alata može biti u granici 0 - 1 000 mm/min.



Slika 31. Prikaz numeričko upravljanih stroja – Mollart Omnisprint [12]

## 5.3. Numerički upravljani stroj- Toyota

Obradni su centri poduzeća Toyota kompaktni, horizontalni i visokobrzinski te visokoproduktivni obradni centri. Na Toyodi se mogu obavljati različiti postupci obrade materijala pa tako i duboko bušenje. Broj numeričkih upravljanih osi je 4, kako je prikazano na slici 32. Od toga se 3 osi mogu kontrolirati simultano. To je os X – uzdužno gibanje stupa, os Y – vertikalno gibanje vretena i os Z – dijagonalno gibanje stola. Četvrta os je os B, a ona podrazumijeva zakretanje stola.



**Slika 32. Prikaz numeričkih upravljanih osi na Toyodi [13]**

Brzina rezanja koja se može postići na ovom stroju je 1 - 30 000 mm/min. Brzina vrtnje vretena može biti u rasponu od 50 do 15 000 min<sup>-1</sup>. Na slici 33. je prikazan jedan od mnogobrojnih modela obradnih centara poduzeća Toyota.



**Slika 33. Prikaz obradnog centra Toyota**

Nakon što programer napiše program za određeni stroj i kalup, pošalje ga na mrežu. Operater na stroju zatim, kada dolazi serija kalupa, pozove program u upravljačko računalo stroja koje se može vidjeti i na slici 33, te zatim on dalje upravlja njegovim radom kako je u prijašnjim koracima (4.4.1) objašnjeno. Na taj je način najbrže i najjednostavnije izraditi provrt u kalupu za izradu staklenih boca uz visoku točnost i preciznost.

## 6. ZAKLJUČAK

Obrada odvajanjem čestica sastoji se od niza različitih postupaka kod kojih se od početnog volumena sirovog materijala odstranjuje određena količina materijala u obliku odvojenih čestica, a sve u svrhu izrade, odnosno formiranja gotovog izratka. Kod toga su u izradi dijelova neophodni postupci dubokog bušenja. S obzirom na to da je cilj industrijske proizvodnje ostvariti profit, ona mora biti suvremena, kvalitetna, ekonomična i nadasve konkurentna. Da bi se to ostvarilo, neophodno je smanjenje troškova i reduciranje potrošnje energije i korištenih resursa u obradnim procesima. Ulaže se dosta novaca i truda u razvoj novih materijala alata i poboljšanje postojećih. Razlog tome je sve veći broj proizvođača reznih alata i strojeva, a samim time je i konkurencija na tom tržištu velika. Proizvođači alata i strojeva za duboko bušenje sve se više fokusiraju na smanjenje vremena trajanja procesa pa tako postavljaju određene zahtjeve jedni pred druge.

U postupcima dubokog bušenja kalupa za izradu staklenih boca sve se više koristi duboko bušenje specijalnim spiralnim svrdlom s unutarnjim dovodom emulzije. Taj postupak ima brojne prednosti, od kojih se izdvajaju velika produktivnost, brzina, preciznost i točnost. Nekih većih nedostataka nema, osim cijene stroja i samog svrdla koja se kreće ovisno o promjeru provrta i dubini bušenja. Tako za Titex svrdlo XD30 tehnologije treba izdvojiti otprilike 2000 kuna, dok za specijalno spiralno svrdlo poduzeća Ceratizit koje se koristi za duboko bušenje provrta do 50 promjera treba izdvojiti 3500 kuna. Sve manje se koristi bušenje topovskim svrdlom zbog toga što je proces izrazito spor, ali je prednost toga postupka cijena jednoreznog topovskog svrdla koja iznosi samo 350 kuna. Također, tvrtka Omco kod dubokog bušenja topovskim svrdlima koristi alatni stroj s četiri glavna vretena što omogućava izradu provrta u četiri kalupa istovremeno, a sve to predstavlja određenu uštedu.

Uvijek, pa tako i u postupcima dubokog bušenja, postoji još puno prostora za istraživanja koja bi mogla pridonijeti poboljšanju tih postupaka.

## LITERATURA

- [1] Šime Šavar, Obrada odvajanjem čestica II.dio, Zagreb, 1990.
- [2] Bruno Rebec, Rezni alati sa dodatkom određene geometrije oštrice, Zagreb, 1990.
- [3] Nedić B.,Lazić M.:Proizvodne tehnologije: Obrada metala rezanjem, predavanja; Mašinski fakultet, Kragujevac
- [4] D.Ciglar, Predavanja iz kolegija; Alati i naprave, 2014
- [5] <http://www.riteh.uniri.hr/ustroj/zavodi/ziim/>, pristupio 01.02.2017.
- [6] <https://www.tbt.de/en/deep-hole-drilling-tools-en/single-lip-drill>, pristupio 30.01.2017
- [7] [http://www.fms-tools.fi/images/uploads/pdf/XD\\_Eng.pdf](http://www.fms-tools.fi/images/uploads/pdf/XD_Eng.pdf)
- [8] <https://engineerharry.wordpress.com/2012/04/21/drills-drilling/>, pristupio 01.02.2017.
- [9] SANDVIK Coromant Rotating Tools; katalog alata 2014.
- [10] Walter Titex, katalog alata, 2014.
- [11] Cajhen, katalog alata, 2017.
- [12] Mollart, katalog strojeva, 2011.
- [13] Toyoda, katalog strojeva, 2014.

## **PRILOZI**

### **I. CD-R disc**